

**ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**  
**ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Наук о Земле

**ТЮГАЛЕВА Анастасия Ивановна**

**Выпускная квалификационная работа**

***"Численное моделирование дрейфа айсберга"***

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.04 «Гидрометеорология»

Профиль «Океанология»

Научный руководитель:  
ассистент кафедры океанологии  
кандидат географических наук  
МАЙ Руслан Игоревич

Рецензент:  
Начальник отдела ледового режима и прогнозов  
ФГБУ «АНИИ»  
доктор географических наук  
МИРОНОВ Евгений Уарович

Санкт-Петербург

2020

## Оглавление

Введение	3
Глава 1. Обзор литературных источников	5
1.1. Модели дрейфа айсберга	5
1.2. Разрушение айсберга	8
Глава 2. Численная схема модели и её верификация	10
2.1. Описание модели	10
2.2. Проверка модели с использованием инструментальных данных	13
Глава 3. Параметризация айсберга	15
3.1. Регрессионные соотношения для восстановления параметров айсберга	15
3.2. Разрушение айсберга	17
Глава 4. Адаптация модели дрейфа айсберга под условия Карского моря	19
4.1. Используемые данные	19
4.1.1. Описание данных	19
4.1.2. Данные для моделирования	21
4.1.3. Преобразование данных	21
4.2. Использование модели для акватории Карского моря	22
4.3. Режимные характеристики дрейфа айсберга в Карском море	25
4.3.1. Айсберговая опасность	25
4.3.2. Средние направления и скорости дрейфа	29
Заключение	33
Список литературы	35
Приложение 1. Карты условной вероятности	38

## Введение

В настоящее время идет активный процесс изучения и освоения Арктического региона. На шельфах морей идет разработка нефте- и газодобычи, строительство буровых станций, развитие Северного морского пути. В связи с этим является актуальным вопрос изучения ледовой обстановки и опасных явлений. К последним, в частности, относятся айсберги. Способные дрейфовать против ветра, они представляют большую опасность для хозяйственной деятельности человека в Арктике.

Существуют различные способы идентификации айсбергов в морях – гидроакустические средства и радиолокаторы, спутниковые снимки и стационарные буи, закрепленные во льду с целью отслеживания координат айсберга. Точность идентификации ледяного тела и его параметров с судов зависит от конфигурации самого айсберга, а также от состояния окружающей воды. Спутники дают довольно высокую точность определения айсбергов, но она снижается с уменьшением размера последнего. Достоверность спутниковой информации о местоположении айсберга определяется пространственным разрешением прибора, углом визирования, шероховатостью подстилающей поверхности (Миронов и др., 2015). Основным минусом такого метода является неполнота информации об айсберге. По спутниковым снимкам невозможно оценить подводную часть исследуемого объекта. Установленные на айсбергах буи предоставляют высокоточную информацию о местоположении ледяного объекта, однако при перевороте айсберга происходит поломка приборов.

Поиск оптимального решения для отслеживания айсберга является актуальным вопросом. Одним из методов является моделирование. Модель можно использовать как диагностическую и прогностическую систему определения местоположения айсберга, так и в качестве аппарата для создания гипотетических траекторий для расчета режимных характеристик дрейфа айсбергов для акваторий.

*Цель данной работы:* создать численную диагностическую модель дрейфа айсберга для юго-западной части Карского моря.

Для выполнения цели работы были поставлены следующий задачи:

1. Описать численную модель дрейфа айсберга и верифицировать ее по данным инструментальных измерений;
2. Реализовать эмпирические зависимости восстановления массы и геометрических параметров айсберга;
3. Описать разрушение айсберга под действием внешних сил;

4. Создать диагностическую систему моделирования дрейфа айсберга для акватории Карского моря;
5. Сформулировать метод расчета айсберговой опасности для выбранной акватории, произвести расчет;
6. На основе модели провести расчет режимных характеристик дрейфа айсберга для акватории Карского моря.

# Глава 1. Обзор литературных источников

## 1.1. Модели дрейфа айсберга

Для описания сил, которые используются при моделировании дрейфа айсбергов, критически анализировались работы (*Клячкин, Май, 2012; Abrahamowicz, 2007; Kechouche et al., 2009; Kechouche et al., 2010; Smith, Donaldson, 1987; Smith, 1993*). В этих работах учитывались следующие силы.

### *Сила воздействия ветра*

Сила воздействия ветра является одной из основных, определяющих дрейф айсберга. Однако в современном моделировании существуют различные описания этой силы. В основном, можно выделить два подхода:

1. Учитывается только лобовое сопротивление (действующее на вертикальную площадь надводной части айсберга)
2. Учитывается лобовое и поверхностное сопротивление (действующее на горизонтальную площадку вершины айсберга)

В работах (*Smith, 1993; Smith, Donaldson, 1984*) для расчета дрейфа учитывается действие ветра только на вертикальную площадь надводной части айсберга, нормальной к направлению ветра. Коэффициенты сопротивления формы взяты 1.0, то есть рассчитывается оптимальное сопротивление.

В работе (*Abrahamowicz, 2007*) сила воздействия ветра представлена как сумма лобового (на стенки айсберга) и касательного (на вершину айсберга) сопротивлений. Сила воздействия ветра на горизонтальную площадь айсберга принимает небольшие значения, которые имеют минимальный вклад в дрейф айсберга. Она становится значимой, когда горизонтальные размеры айсберга во много раз превышают вертикальные. Это характерно для больших столообразных айсбергов (ледяных островов) Антарктиды и Западной Гренландии.

Такой же подход используется в модели, описанной в работе (*Kechouche et al., 2009*). В этой статье приведены коэффициенты сопротивления поверхности – 0.0022, т.е. основным составляющим силы воздействия ветра является сила лобового сопротивления.

Авторы модели дрейфа айсбергов ААНИИ (*Клячкин, Май, 2012*) также используют сумму касательного и лобового сопротивления для вычисления силы воздействия ветра. Коэффициенты сопротивления поверхности соответствуют коэффициентам в модели дрейфа льда.

### *Сила воздействия течений*

Для расчета силы воздействия течений используется такой же подход, как и при расчете ветрового форсинга. Различие заключается в том, что сила воздействия течений рассчитывается по горизонтам.

В работах (*Smith, 1993; Smith, Donaldson, 1984*) рассчитывается сила воздействия течений только на стенки подводной части айсберга. Коэффициент сопротивления равен 1.0 и не изменяется по глубине.

В моделях (*Abrahamowicz, 2007; Kechouche et al., 2009; Клячкин, Май, 2012*) также учитываются воздействие течений и на стенки, и на горизонтальную площадь айсберга (по киллю). Коэффициент касательного напряжения составляет 0.0055, т.е. это слагаемое становится значительным при больших горизонтальных размерах. Кроме того, с точки зрения получения информации довольно сложно оценить параметры подводной части айсберга.

### *Сила, обусловленная наклоном уровня моря*

Данная сила учитывается не во всех моделях. Так, например, в модели (*Smith, 1993*) не берется ее в расчет. Кроме того, имеются различные трактовки и интерпретации данной силы:

- В модели (*Smith, Donaldson, 1984*) рассчитывают силу давления столба жидкости на объем айсберга, т.е. силы давления будут влиять так же, как они будут влиять на массу воды, которую он вытесняет. Таким образом, при отсутствии приложенных внешних сил айсберг будет ускоряться так же, как и столб воды;
- В работе (*Abrahamowicz, 2007*) представлен расчет силы наклона уровня моря на основе данных высоты поверхности. вычисляется динамическая высота в шести точках сетки, ближайших к местоположению айсберга;
- В работах (*Kechouche et al., 2009; Клячкин, Май, 2012*) для описания данной силы авторы используют угол наклона уровня моря, т.е. полную производную от уровня моря по размерам ячейки.

### *Сила воздействия морского льда*

Взаимодействие айсберга со льдами до сих пор вызывает повышенный интерес у исследователей, так как оно все ещё не изучено досконально и произвести полное описание этого взаимодействия сложно. Именно поэтому при расчете силы воздействия морского льда

появляется большое количество условий, которые, однако, используются во всех моделях и являются абсолютно идентичными.

Так, в моделях (*Abrahamowicz, 2007; Keghouche et al., 2009; Клячкин, Май, 2012*) сила воздействия морского льда не учитывается при сплоченности последнего 1,5 балла и менее. Если же сплоченность льда более 9 баллов и его прочность превышает пороговую – дрейф айсберга полностью совпадает с дрейфом льда. При сплоченности льда от 1,5 до 9 баллов формула расчета силы воздействия морского льда имеет схожий вид с формулами расчета сил воздействия ветра и течений, т.е. представляет собой произведение относительной скорости льда и площади взаимодействия айсберга со льдом (толщина льда на горизонтальную площадь айсберга по ватерлинии).

В работах (*Smith, 1993; Smith, Donaldson, 1984*) данная сила не представлена. Это связано с периодом моделирования в работе – лето в северном полушарии (июль).

#### *Сила волнового воздействия*

Так же, как и сила, обусловленная наклоном уровня моря, сила волнового воздействия представлена не во всех моделях и имеет различное выражение.

В работе (*Smith, 1993*) для описания данной силы используется длина айсберга и амплитуда волны. Автор уточняет, что данная сила является минимальным движителем для айсберга, однако позволяет уточнить моделируемый трек. Длинные волны в расчет не берутся. В работе так же указывается и тот факт, что данные о волнах получить достаточно затруднительно. Т.к. ветер и волны вызывают силы, действующие в одном направлении, то для учета волнового воздействия при моделировании используется завышенный коэффициент сопротивления.

Автор работы (*Abrahamowicz, 2007*) представляет эту силу как квадрат амплитуды волны, падающей нормально на стенки айсберга. В своей работе она переходит к пересчету амплитуды волны с точки зрения скорости ветра на основе данных в морской шкале Бофорта.

Автор статьи (*Keghouche et al., 2009*) вводит в свою модель силу воздействия волн завышенным коэффициентом сопротивления силы воздействия ветра.

Авторы работы (*Клячкин, Май, 2012*) также используют для расчетов силу воздействия волн, рассчитанную через произведения квадрата амплитуды на линейные размеры айсберга по ватерлинии.

Кроме того, нужно учитывать тот факт, что расчет данной силы возможен только на открытой воде. Таким образом, при сплоченности льда более 1,5 баллов сила волнового воздействия приобретает иной характер.

#### *Сила сопротивления грунта*

В модели (Клячкин, Май, 2012) при уменьшении глубины возле берега учитывается сила, описывающее взаимодействие айсберга с дном. Представлена как произведение площади поверхности контакта киля айсберга и ненарушенного донного грунта на коэффициент сопротивления.

### **1.2. Разрушение айсберга**

(Keghouche et al., 2010) выделяет три важнейших механизма разрушения айсбергов:

1. Волновая эрозия, которая является основным источником уменьшения размеров айсберга
2. Боковое (lateral) плавление – действует на стенки подводной части айсберга
3. Донное (basal) плавление – действует на киль айсберга, основано на передаче тепла от воды к айсбергу из-за разных скоростей движения

Волновая эрозия в работе (Keghouche et al., 2009) представляет собой зависимость от температуры поверхности моря и сплочённости морского льда. Эффект воздействия самих волн выражается состоянием поверхности моря, рассчитываемое по скорости ветра через шкалу Бофорта.

Боковое таяние рассчитывает на основе разницы температуры морской воды и температурой точки замерзания на границе раздела различных слоев.

Донное плавление определяется относительной скоростью течений у основания айсберга и разницей температур между окружающими айсберг водами и точкой замерзания вод.

Используя данный механизм для определения плавления айсберга и продолжительности его жизни, (Keghouche et al., 2009) получил результаты, сопоставимые с наблюдениями

В работе (Abrahamowicz, 2007) волновая эрозия описывается как сила, вызывающая неровности в айсберге, которые затем разрушаются под собственной тяжестью. Поэтому при расчете сил учитывается радиус этой неровности (0.01 м). Кроме этого, в расчет берется высота и период волны и разница температур поверхности моря и температуры у поверхности айсберга (-1.8 °C).



Боковое плавление рассчитывается на основе разности температур  $k$ -того слоя и поверхности айсберга в этом слое, суммируемых по всем слоям океана, в которые погружен айсберг.

Используемые в вычислении донного таяния, число Прандтля (13.4), теплопроводность ( $0.563 \text{ (кг*м)/(с}^3\text{*}^\circ\text{C)}$ ) и кинематическая вязкость ( $1.83*10^{-6} \text{ м}^2\text{/с}$ ) морской воды принят постоянным. Кроме того, используется скрытая теплота плавления льда, равная  $3.34*10^5 \text{ м}^2\text{/с}^2$ . Основной расчет определяется разностью скоростей айсберга и разностью температур окружающих вод и поверхности айсберга.

Донное плавление действует на киль айсберга и приводит к уменьшению осадки и смещению центра тяжести ледяного тела. Именно поэтому (*Abrahamowicz, 2007*) вводит понятие “Roll-over criterion”, который учитывает возможность опрокидывания айсберга. Если отношение осадки к высоте айсберга станет меньше некоторого порогового значения, рассчитываемого на основе имеющейся высоты и осадки айсберга, то последний опрокинется и осадка и высота станут взаимозаменяемы. В своем исследовании (*Abrahamowicz, 2007*) учитывает этот критерий для всех моделируемых айсбергов.

## Глава 2. Численная схема модели и её верификация

### 2.1. Описание модели

Основным уравнением модели дрейфа айсберга является уравнения движения, в основе которого лежит второй закон Ньютона

$$F = ma \quad (1)$$

где  $F$  — векторная сумма всех сил, действующих на айсберг.

Во всех рассмотренных моделях имеется различный набор сил, составляющих  $F$ , однако такие, как сопротивление ветра, воды, льда и сила Кориолиса, присутствуют в каждой. Прочие силы, такие, как сила волнового воздействия, взаимодействие с грунтом и сила градиента давления являются дополнительными и учитываются далеко не во всех моделях.

Модель дрейфа айсберга в работе состоит как из наиболее распространенных сил, так и из тех, что встречаются разово в одной из анализируемых моделей:

$$F = F_A + F_W + F_P + F_I + F_C + F_r, \quad (2)$$

Тогда полное уравнение можно записать:

$$M \frac{du}{dt} = F_A + F_W + F_P + F_I + F_C + F_r, \quad (3)$$

где  $M$  — масса айсберга

$u$  — составляющая скорости дрейфа айсберга

$F_A$  — сила воздействия ветра

$F_W$  — сила воздействия течений

$F_P$  — сила градиента давления

$F_I$  — сила воздействия морского льда

$F_C$  — сила Кориолиса

$F_r$  — сила волнового воздействия (Тюгалева, Май, 2018).

#### *Сила воздействия ветра*

Воздействие ветра на айсберг выражается как сумма сопротивления формы (т. е. ветер действует на вертикальные стенки айсберга) и поверхностное сопротивление (т. е. ветер действует на вершущку айсберга):

$$\begin{aligned} F_A &= \underbrace{\frac{1}{2} (p_a c_a A_{va}) |u_a - u_i| (u_a - u_i)}_{formdrag} + \underbrace{(p_a c_{da} A_{ha}) |u_a - u_i| (u_a - u_i)}_{skindrag} = \\ &= \left[ \frac{1}{2} (p_a c_a A_{va}) + (p_a c_{da} A_{ha}) \right] |u_a - u_i| (u_a - u_i), \quad (4) \end{aligned}$$

где  $p_a$  — плотность воздуха

$c_a$  — безразмерный коэффициент сопротивления формы

$c_{da}$  — безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления воздуха

$A_{va}$  — поперечное сечение айсберга, подверженное ветру

$A_{ha}$  — горизонтальные (верхние) участки айсберга, подверженные действию ветра

(Abrahamowicz, 2007; Keghouche et al., 2009)

Некоторые модели используют упрощенный вариант силы сопротивления ветра, учитывая только лобовое сопротивление, например, модели (Smith, 1993; Smith, Donaldson, 1987).

#### Сила воздействия течений

Сила воздействия течений также, как и сила сопротивления ветра, расписывается как сумма действующих сил на погруженные вертикальные стены айсберга (form drag) и на основание айсберга (skin drag). Для получения более точных результатов водную толщу, в которой лежит айсберг, разбивают на дискретные слои, а сама сила воздействия течений является суммой сопротивления по всем этим слоям. Тогда сила воздействия течений на айсберг будет выражаться формулой:

$$F_W = \underbrace{\frac{1}{2} p_w c_w \sum_{k=1}^n A_k |u_w^k - u_i| (u_w^k - u_i)}_{formdrag} + \underbrace{p_w c_{dw} A_{hw} |u_w^n - u_i| (u_w^n - u_i)}_{skindrag}, \quad (5)$$

где  $k$  — уровень слоя воды ( $k=1$  — поверхность воды,  $k=n$  — слой максимального погружения айсберга)

$A_k$  — площадь поперечного сечения в  $k$ -том слое

$u_{kw}$  — скорость воды  $k$ -того слоя

$c_w$  — безразмерный коэффициент сопротивления формы

$c_{dw}$  — безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления воды

$u_{nw}$  — скорость течения на  $n$ -ном слое

$A_{hw}$  — горизонтальная поверхность (основание), которая подвергается воздействию течений.

Так же в модели (Smith, 1993) используется упрощенная формула

$$F_W = \frac{1}{2} p c_w \sum_k A_k |u^k| u^k, \quad (6)$$

т. е. не учитывается поверхностное сопротивление основания айсберга.

#### Сила градиента давления

Под влиянием различных факторов, таких, как неравномерное распределение тепла, солености, давления в толще воды и на ее поверхности, происходит изменение уровня

поверхности океана (углубление или выступ). Наклон морской поверхности вызывает силу градиента давления, влияющую на траекторию движения айсберга:

$$F_p = -Mgsina, (7)$$

где  $\alpha$  — наклон уровня моря (Клячкин, Май, 2012).

Сила градиента давления является индивидуальной силой (т. е. её учитывают не во всех моделях).

#### *Сила воздействия морского льда*

Сила воздействия морского льда является силой противодействия движению айсберга. Сложное взаимодействие морского льда и айсбергов недостаточно изучено. Поэтому сила воздействия льда имеет различное выражение в зависимости от его сплоченности.

Так

$$F_l = \begin{cases} 0, & \text{при сплоченности льда менее 15\%} \\ -(F_A + F_W + F_C + F_{SS}) + \frac{du}{dt}, & \text{при 90\% сплоченности,} \\ \frac{1}{2}(p_{si}c_{si}A_{si})|V_{si} - u|(V_{si} - u), & \text{в остальных случаях} \end{cases} (8)$$

здесь  $p_{si}$  — плотность морского льда

$c_{si}$  — коэффициент сопротивления

$A_{si}$  — площадь взаимодействия морского льда и айсберга

$V_{si}$  — скорость дрейфа морского льда.

#### *Сила волнового воздействия*

Сила волнового воздействия по направлению совпадает с силой воздействия ветра, но по абсолютному значению много меньше, поэтому в некоторых моделях она входит в расчет силы воздействия ветра в виде завышенного коэффициента сопротивления формы. В данной модели сила воздействия волн вынесена в отдельную компоненту с целью уточнения модели. Формула для вычисления силы взята из работы (Abrahamowicz, 2007):

$$F_r = \frac{(0.02025)^2}{16} \rho_w g L |u_a|^3 u_a, (9)$$

где  $L$  — длина айсберга, подверженная воздействию волн.

Расчет воздействия данной силы происходит при сплоченности льда менее 15%.

## 2.2. Проверка модели с использованием инструментальных данных

Для построения дрейфа айсберга и верификации модели были использованы данные отслеживания небольшого пирамидального айсберга 83-1 в проливе Белл-Айл за период с 5:00 до 19:10 за 24 июня 1983 года, взятые из работы (*Smith, Donaldson, 1987*).

Таблица 1. Параметры айсберга 83-1

Высота, м	Длина, м	Ширина, м	Осадка, м	Масса, кт
19	66	37	54	85



Рисунок 1. Айсберг 83-1

При моделировании траектории дрейфа айсберга в расчет не брались те данные, когда судно находилось на расстоянии более одной морской мили от исследуемого объекта. Это объясняется в работе (*Smith, 1993*) тем, что течения, измеренные вблизи судна, являлись нерепрезентативными вблизи айсберга.

В модели использовались силы воздействия ветра, течений и сила Кориолиса. Этот факт обуславливается отсутствием других данных за этот период времени. Коэффициенты  $C_a$  и  $C_w$  были взяты равными 0.6 и 2.6 соответственно, были выбраны методом перебора значений. Такие же коэффициенты рекомендуются авторами в статьях (*Smith, Donaldson, 1987; Smith, 1993*). При  $C_w \geq 3.0$  происходила численная неустойчивость расчетов и айсберг приобретал нереальные скорости.

Шаг по времени для расчета сил составил 2 минуты. При увеличении шага вновь происходила численная неустойчивость. При изменении шага от 10 до 120 секунд происходило незначительное смещение трека относительно точки начала, но в основном траектория оставалась неизменной (Рис. 2)

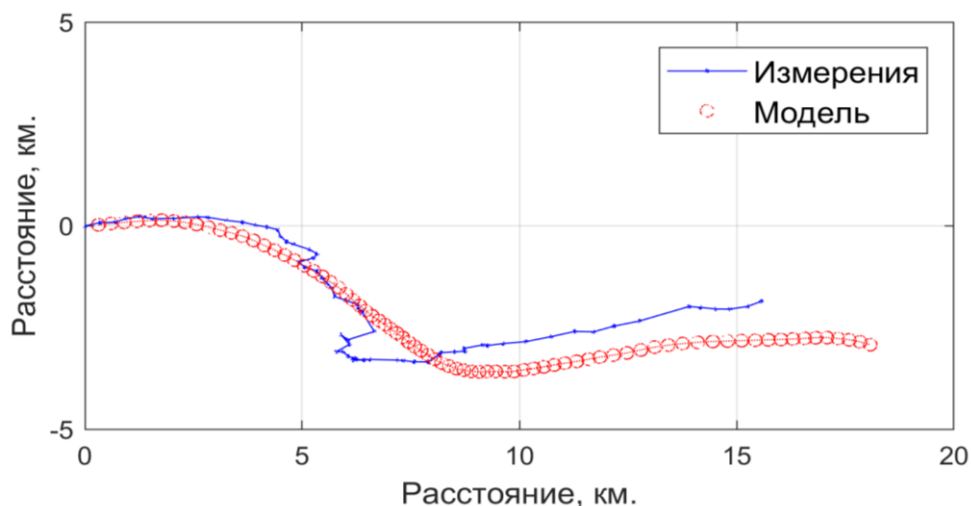


Рисунок 2. Реальный и модельный треки айсберга

На данном этапе сравнение данных изменения реального положения айсберга и модельной траектории проводилось в терминах ортогональных составляющих векторов перемещения айсберга. Первая составляющая – перемещение айсберга вдоль меридиана, вторая вдоль параллели. Такой подход часто используется зарубежными авторами для сравнения векторных процессов (*Lavergne, 2009*).

Запись данных дрейфа айсберга происходит с 10-минутной дискретностью. По полученным данным корреляция векторов смещения моделируемого и измеренного айсбергов составила 0,98 для составляющей векторов вдоль параллели, и 0,99 для меридиональных перемещений. Средняя абсолютная ошибка положения моделируемого объекта составила 1,16 и 0,34 км для соответствующих составляющих.

## Глава 3. Параметризация айсберга

### 3.1. Регрессионные соотношения для восстановления параметров айсберга

В введении работы были описаны основные методики обнаружения айсбергов. Как правило, при помощи таких методов можно получить достоверную информацию только о надводной части айсберга (ширина, длина, высота). Полноценные работы по измерению параметров айсберга проводятся довольно редко.

Для моделирования огромное значение имеют характеристики подводной части айсберга и другие параметры надводной части и всего айсберга в целом. Так, например, для расчета силы воздействия ветра необходима площадь поперечного сечения айсберга, для расчета силы воздействия течений нужна информация по площади подводной части айсберга, разбитой по различным горизонтам. Для учета возможности посадки айсберга на мель необходимо знать его осадку, а для расчета силы Кориолиса – массу айсберга. Таким образом, становится очевидным, что спутниковая информация и данные судовой разведки не дают точной информации о всех параметрах айсберга.

Одним из способов оценки параметров подводной части айсбергов является вывод и использование различных регрессионных соотношений между известной (длиной, шириной, высотой) и неизвестной характеристикой айсберга.

Связь линейных размеров айсберга с массой и геометрическими размерами можно представить степенной функцией вида:

$$Y = kL^n, (10)$$

где  $Y$  — неизвестный параметр айсберга;

$k$  — коэффициент соотношения длины айсберга с неизвестным параметром;

$L$  — длина айсберга;

$n$  — коэффициент размерности (1 — для линейных размеров, 2 — для площадных, 3 — для объемных).

Коэффициент  $k$  рассчитывается на основе уже известных параметров айсберга при помощи метода наименьших квадратов:

$$k = \frac{\sum Y L^n}{\sum L^{2n}}, (11)$$

Оценками качества полученных соотношений выступают:

- Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2},$$

- Среднеквадратическая ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y-\hat{Y})^2}{N}},$$

- Средняя относительная ошибка:

$$MAE = \frac{\sum|Y-\hat{Y}|}{N},$$

где  $\hat{Y}$  — среднее значение измеренных параметров.

На основе базы данных ААНИИ были выведены следующие регрессионные соотношения, которые использовались при моделировании:

$$S_{va}=0.0472*L^2 \text{ — площадь лобового сопротивления. (10.1)}$$

$$R^2=0.68, RMSE=125 \text{ м}^2, MAE=88 \text{ м}^2.$$

$$S_{hw}=0.3828*L^2 \text{ — горизонтальная площадь айсберга по ватерлинии. (10.2)}$$

$$R^2=0.85, RMSE=5\,590 \text{ м}^2, MAE=2\,888 \text{ м}^2.$$

$$V_a=0.01*L^3 \text{ — объем надводной части айсберга. (10.3)}$$

$$R^2=0.67, RMSE=34\,544 \text{ м}.$$

$$M=\rho*0.1975*L^3 \text{ — масса айсберга. (10.4)}$$

$$R^2=0.71, RMSE=75\,480 \text{ кг}, MAE=43\,860 \text{ кг}.$$

$$D=0.52*L \text{ — осадка айсберга. (10.5)}$$

$$R^2=0.36, RMSE=19 \text{ м}, MAE=14 \text{ м. (Май и др., 2018, May et al., 2019)}$$

Указанные эмпирические соотношения реализованы в виде компьютерной программы и используются для расчета массы и геометрических параметров айсберга.



### 3.2. Разрушение айсберга

Под действием различных физических и гидрометеорологических параметров происходит разрушение айсберга в ходе его движения в различных средах (вода-воздух). (Savage,2001) сформулировал 5 основных компонент, которые являются определяющими при описании разрушения айсберга:

1. Волновая эрозия (до 60 %)
2. Вертикальная конвекция, связанная с таянием айсберга (~15%)
3. Горизонтальная конвекция, связанная с движением айсберга (~1.5%)
4. Воздействие солнечной радиации (~3.5%)
5. Отёл – откалывание крупных частей от айсберга под воздействием различных факторов. (~20%)

Довольно сложно достоверно оценить механизмы разрушения айсберга, все вышеупомянутые факторы представлены в работах (Broström et al., 2009; Savage,2001; Abrahamowicz,2007, Neshyba, Josberg,1980) как результат теоретических расчетов. По причине сложности получения данных для расчета всех этих параметров, в данной работе для уточнения модели используется расчет таяния айсберга под воздействием ветровой эрозии, т.к. этот фактор является самым значимым из всех вышеперечисленных.

Волновая эрозия – это основной источник айсберговой деградации. Уравнение, по которому происходит оценка разрушения айсберга по ватерлинии, имеет вид:

$$V_{we} = 0.000146 \left(\frac{R}{H}\right)^{0.2} \left(\frac{a_w}{\tau}\right) \Delta T, \quad (12)$$

где  $V_{we}$  — скорость таяния, м/с;

$R$  — высота шероховатости на ватерлинии, для упрощения равна 0.01 м;

$\Delta T$  — разница температуры и точки замерзания морской воды, т.е.  $\Delta T = T_W - T_{fr}$ ;

$T_{fr} = -0.036 - 0.0499S - 0.000112S^2$  — температура замерзания морской воды в зависимости от солености;

$\tau$  и  $a_w$  — период и высота волн в секундах и метрах соответственно.

Расчет последних двух параметров опирается на уравнения, описанные в работе (Abrahamowicz,2007):

$$a_w = \frac{0.3|u_a|^2}{g} \left( 1 - \left[ 1 + \frac{0.004\sqrt{gF}}{|u_a|} \right]^{-2} \right) \quad (13)$$

$$\tau = 3.3(a_w)^{0.63} \quad (14)$$

Здесь  $u_a$  — скорость ветра;

$F$  — расстояние разгона ветра, принимаемое равным 50 км;

$g$  — ускорение свободного падения.

В модели разрушение айсберга реализовано следующим образом.

- $V_{we}$  представляет собой изменение длины айсберга, которое рассчитывается по вышеуказанным формулам раз в сутки.
- Полученное изменение вычитается из длины айсберга. Далее, по измененному значению длины происходит перерасчет всех параметров на основе регрессионных соотношений, упомянутых ранее.
- Если длина айсберга становится меньше 16 м (это связано с классификацией айсбергов по словарю морских ледовых терминов (*Бородачев и др., 1994*), согласно которому айсбергом считается ледяное тело с длиной не менее 16 м), происходит запись имеющейся траектории, а сам моделируемый объект исключается из дальнейшего дрейфа.

## Глава 4. Адаптация модели дрейфа айсберга под условия Карского моря

### 4.1. Используемые данные

#### 4.1.1. Описание данных

*Система диагноза и прогноза для Северной Атлантики и Арктики TOPAZ4*

TOPAZ (<http://marine.copernicus.eu>) является продуктом разработки и поддержки Центром экологического и дистанционного зондирования им. Нансена (NERSC).

Основная цель TOPAZ – создание системы прогнозирования океанических течений (Bertino, Lisæter, 2003). Помимо этого, данной моделью прогнозируются уровень поверхности моря, температура и соленость, различные характеристики ледовой обстановки.

Наблюдения, которые ассимилируются TOPAZ4, включают в себя аномалии уровня моря, температуру поверхности по данным NOAA, температуру и соленость *in situ* с гидрографических судов и с портов, характеристики ледовой обстановки из данных OSISAT и CS2SMOS. Данные охватывают весь Арктический регион от 65° с. ш. к северу.

*Уровень морской поверхности.* Данные по уровню моря поступают со спутников TOPEX/Poseidon, ERS1, Jason-1, Jason-2, ENVISAT. Они геофизически исправлены для приливов, эффекта «обратного барометра», тропосферных и ионосферных сигналов.

*Температура морской поверхности.* Температура получена при помощи системы OSTIA, которая производит анализ высокого разрешения текущей температуры морской поверхности для глобального океана. Это базовый продукт температуры морской поверхности, объединяющей данные от инфракрасных датчиков, микроволновых датчиков, и данных *in situ* с судов и буёв.

*Профили температуры и солёности.* Эти данные загружаются из центра обработки данных Кориолис, которые поступают с научно-исследовательских судов, судов погоды и др. Прогноз температуры для каждого слоя и точки, где отсутствуют данные линейно интерполируют как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.

*Данные о ледовой обстановке.* Характеристики ледяного покрова вычисляются с помощью алгоритма ARTIST. Продукт дрейфа морского льда предоставляется CERSAT. Данные имеются с октября по апрель включительно и не предоставляют информацию рядом с ледяным краем. Трёхдневный дрейф выбран для того, чтобы усреднить некоторые случайные ошибки, при этом избегая потери большого количества данных вблизи побережья. Продукт толщины льда представляет собой объединенный набор данных измерений тонких и толстых морских льдов. Объединенный продукт отбирается ежедневно.

Модель TOPAZ4 использует сетку HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) версии 2.2.18. HYCOM – примитивное уравнение, общая модель циркуляции с вертикальными координатами, которые остаются изопикническими в открытом, стратифицированном океане. Изопикническая вертикальная координата плавно переходит в z-координаты в слабо стратифицированном верхнем слое, к координатам сигма-рельефа в мелководных районах и обратно к координатам z в очень мелкой области. Последний переход предотвращает слишком тонкие слои, когда глубины очень мелкие. Сетка HYCOM преобразована в стандартных декартовых координатах: ось X направлена на восток, ось Y направлена на север (Wallcraft et al., 2003).

#### *Глобальный атмосферный реанализ ERA-Interim*

ERA-5 – глобальный атмосферный реанализ, выполняемый ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, (<https://www.ecmwf.int/>)).

ERA-5 охватывает период с 1979 года и продолжается в режиме реального времени. Реанализ ERA-5 производит ассимиляцию данных с 12-часовой цикличностью.

Доступные наблюдения объединяются с уже имеющейся информацией из прогнозов модели. Происходит расчет таких характеристик как температура, ветер, давление, снег, океанские волны и др. Моделирование полей ветра происходит с учетом имеющихся данных на прошедший период времени, сравнивается с поступающими наблюдениями и корректируется, полученные данные используются при дальнейшем моделировании параметра в последующий период времени.

ERA-5 содержит 6-часовые наблюдения трехмерных метеорологических наблюдений и 3-часовые оценки различных параметров и двумерных полей для всех дат с 1 января 1979 года.

Большинство наблюдений поступают со спутников. Для ветра используются данные с ERS-1, ERS-2 и QuikSCAT (данные последнего спутника - только до 2009 года).

Традиционная система наблюдений также имеет место в реализации ERA-5. Измерение ветра in situ получают с помощью радиозондов, пилотных аэростатов, самолетов, профилировщиков ветра. Также ассимилируются данные с судов, дрейфующих буев и наземных станций.

Все наблюдения, используемые в данных ERA-5, проходят проверку качества. К ним относятся проверки полноты отчетов, физической выполняемости целостности маршрутов судов и самолетов, гидростатической согласованности профилей радиозондов.

#### 4.1.2. Данные для моделирования

Данные системы TOPAZ представляют собой набор данных:

- Течений (по горизонтам и на поверхности)
- Уровня моря
- Скорость дрейфа морского льда
- Сплоченность морского льда
- Толщина морского льда

Все наборы представлены с ежечасной дискретностью за период с апрель 2016 по декабрь 2018. Шаг сетки составляет 12,5 x 12,5 км. Проекция сетки – азимутальная.

Данные реанализа ERA-5 представляют собой набор данных по ветру на 10 м. Представлены с 6-ти часовой дискретностью. Шаг сетки 0.75° x 0.75°. Проекция сетки – цилиндрическая.

Так же в модель добавлен расчет приливных течений и уровня. Параметры основных гармоник были получены из модели АОТИМ-5 в узлах регулярной сетки модели.

Для моделирования дрейфа айсбергов производится интерполяция информации о ветре, течениях и уровне на временные шаги интегрирования.

#### 4.1.3. Преобразование данных

Используемые данные представлены в двух различных сетках, поэтому возникает необходимость интерполяции данных из одной сетки в другую. Для моделирования дрейфа айсберга была выбрана азимутальная проекция системы TOPAZ (это связано с преобладанием данных в этой сетке).

Для поворота данных ветра в сетку модели была использована формула поворота осей:

$$\begin{cases} x = X\cos(a) - Y\sin(a) \\ y = X\sin(a) + Y\cos(a) \end{cases} \quad (15)$$

Где,  $x$  и  $y$  — компоненты  $u$  и  $v$  скорости ветра в новых координатах;

$X$  и  $Y$  — компоненты  $u$  и  $v$  скорости ветра в старых координатах;

$a$  — угол поворота осей. (Шнейдер, 1972)

#### 4.2. Использование модели для акватории Карского моря

С использованием метеорологических и океанологических полей ERA-5 и TOPAZ4, было реализовано моделирование дрейфа айсберга в Карском море. Период моделирования: 13.04.2016 – 31.12.2019. Это связано с тем, что именно за этот период TOPAZ4 предоставляет данные океанологических полей на поверхности с часовой дискретностью.

Точки генерации айсбергов соответствуют координатам выводных ледников на северо-восточном побережье Новой Земли. Длина айсбергов случайным образом рассчитывается по теоретическому распределению Вейбулла (May, et. al. 2019), от полученной длины при помощи регрессионных соотношений воссоздается геометрия айсберга, параметры которой необходимы для моделирования.

Шаг вычисления действующих на айсберг сил равен 1 минуте. Однако, для минимизации ошибок, в модели используются данные гидрометеорологических полей с дискретностью один час, принимая, что в течение часа они изменяются настолько незначительно, что этими изменениями можно пренебречь. Таким образом, отсутствует интерполяция данных ERA-5 и TOPAZ в шаг расчета форсинга и уменьшается времязатратность расчетов.

Расчет силы волнового воздействия и разрушение айсберга за счет волн зависит от сплоченности льда в точке нахождения айсберга. Если сплоченность льда менее 1.5 баллов, модель учитывает воздействие волн на айсберг, но не учитывает воздействие льда (при такой оценке сплоченности считается, что айсберг находится в открытой воде). При увеличении этого показателя, происходит расчет воздействия с ледяным покровом, но не рассчитывается воздействие волн. Таким образом, эти силы являются взаимозаменяемыми и их действие ограничивается одним параметром. Если же сплоченность льда больше 9 баллов и коэффициент прочности льда превышает пороговый (6500 Па), дрейф айсберга приравнивается к дрейфу морского льда.

Помимо форсинга на основе внешних гидрометеорологических полей реализован расчет приливов для юго-западной части Карского моря. При помощи модели приливов АОТИМ-5 (Padman, Erofeeva, 2004) были получены приливные постоянные для уровня и течений основных приливных гармоник в узлах сетки модели. По ним происходит расчет приливного уровня и течений, которые также включаются в форсинг.

В модели так же учитывается посадка айсберга на мель. Если осадка моделируемого объекта превышает глубину моря в ячейке сетки модели, скорость айсберга приравнивается к нулю и дрейф останавливается до тех пор, пока равнодействующая вынуждающих сил не

позволит айсбергу переместиться в точку, где его осадка будет меньше глубины. После этого айсберг снова включается в дрейф.

Помимо этого, модель реализует разрушение айсберга во время дрейфа. Основной силой, описанной в работе (*Savage, 2001*) является разрушающая сила волн. Она составляет 60% от всех действующих на айсберг сил, которые приводят к разрушению. Из-за сложности и малоизученности процессов деградации ледяных объектов, используется только эта сила. Как было описано выше, процесс разрушения айсберга возможен только на открытой воде. Для расчета были использованы формулы, представленные в работах (*Broström et al., 2009; Abrahamowicz, 2007*). В модели процесс реализован следующим образом:

- В модельную полночь происходит расчет суммарного таяния моделируемого объекта в течение дня, вычисляется изменение длины айсберга и его новая длина.
- По измененной длине происходит перерасчет всей геометрии моделируемого объекта при помощи регрессионных соотношений.
- По классификации (*Бородачев и др., 1994*), минимальная длина айсберга составляет 16 метров. Именно это значение используется в качестве критической. Если длина моделируемого объекта становится меньше критической, он переходит в класс обломков, ранее сформированная траектория дрейфа сохраняется, а сам айсберг удаляется и исключается из дальнейшего моделирования.

На рисунке 4 приведены примеры траекторий дрейфа айсбергов, точка генерации которых приурочена к выводным ледникам. В этой части акватории среднемесячный перенос айсбергов происходит преимущественно в северном и северо-восточном направлении. Такие результаты моделирования совпадают с оценками генерального направления дрейфа, описанные в работе (*Buzin et al., 2019*). Основной дрейф айсберга имеет северное-северо-восточное направление, и только 1 айсберг двигался на юг в течение продолжительного времени, захваченный Восточно-новоземельским течением.

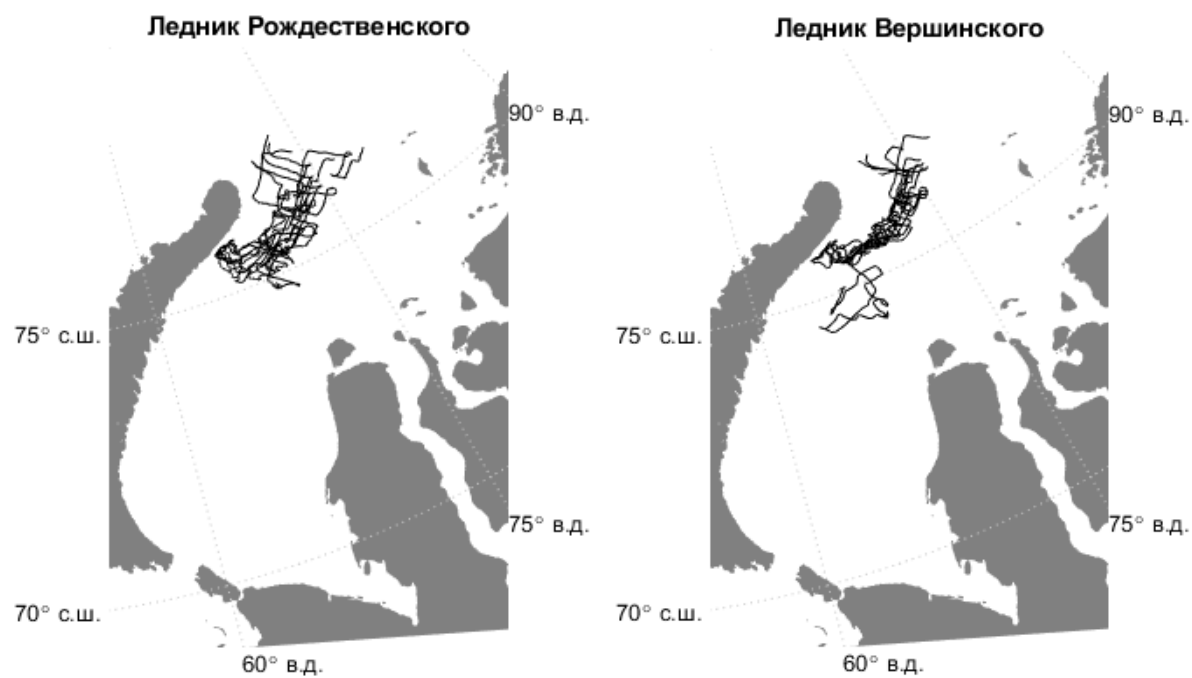


Рисунок 4. Пример модельных траекторий дрейфа айсбергов (13.04.2016-31.12.2016)



#### 4.3. Режимные характеристики дрейфа айсберга в Карском море

Для работы в Арктическом регионе необходимо знать режимные характеристики опасных ледяных образований, к которым, в первую очередь, относятся средние скорости и направление дрейфа айсбергов и айсберговая опасность. Первые оценки режимных характеристик основаны на данных судовых и авиационных наблюдений. Основным методом расчета вероятности является оценка соотношения количества айсбергов в конкретном районе к общему количеству обнаруженных айсбергов за период разведки. Главным минусом такого подхода является нерегулярность проводимых съемок и невозможность полномасштабной съемки.

В данной работе представлен новый метод оценки айсберговой опасности, реализованный на основе модели дрейфа айсберга. Суть этого метода заключается в определении вероятности как отношение суммарного времени нахождения моделируемого объекта в ячейке сетки модели к общему времени моделирования.

Расчет характеристик дрейфа айсбергов основан на построении траектории дрейфа айсберга за определенный промежуток времени.

##### 4.3.1. Айсберговая опасность

*Айсберговая опасность по айсбергопродуктивности.*

В качестве точек генерации были выбраны координаты трех выводных ледников на северо-восточном побережье Новой Земли: ледники Розе ( $76,05^{\circ}$  с.ш.;  $67,00^{\circ}$  в.д.), Вершинского ( $75,72^{\circ}$  с.ш.;  $65,00^{\circ}$  в.д.) и Рождественского ( $75,77^{\circ}$  с.ш.;  $65,50^{\circ}$  в.д.). Координаты ледников взяты из Каталога Ледников СССР (*Каталог...*, 1978). Для каждого ледника был взят средний объем ледяного стока с ледника: 0,040, 0,124 и 0,013 км<sup>3</sup>/год соответственно для каждого ледника (*Tarasov et al.*, 2019). Сезонная изменчивость скорости отела игнорируется, несмотря на увеличение выбросов с июня по сентябрь. Такой подход позволяет оценивать сезонное влияние океанских течений, ветра и морского льда на характеристики дрейфа айсберга в независимости от сезонных колебаний скорости отела (*Keghouche et al.*, 2010).

Моделирование начинается 13 апреля 2016 года и заканчивается 31 декабря 2019 года. По данным стока массы льда (ice flux) рассчитывается время, за которое сформируется определенный айсберг, длина которого задается случайным образом по распределению Вейбулла, а остальные параметры айсберга, включая объем, воссоздаются по регрессионным уравнениям. Таким образом, у каждого выводного ледника генерируются айсберги с временным интервалом, равным времени накопления необходимого объема льда.

После реализации модели происходит расчет айсберговой опасности как суммарное время нахождения айсбергов, отнесенное к общему времени моделирования. Время берется в часах, так как запись всех параметров айсберга происходит с часовой дискретностью.

Таким образом была получена вероятность появления айсберга в юго-западной части Карского моря по данным айсбергопродуктивности выводных ледников (Рис. 5).

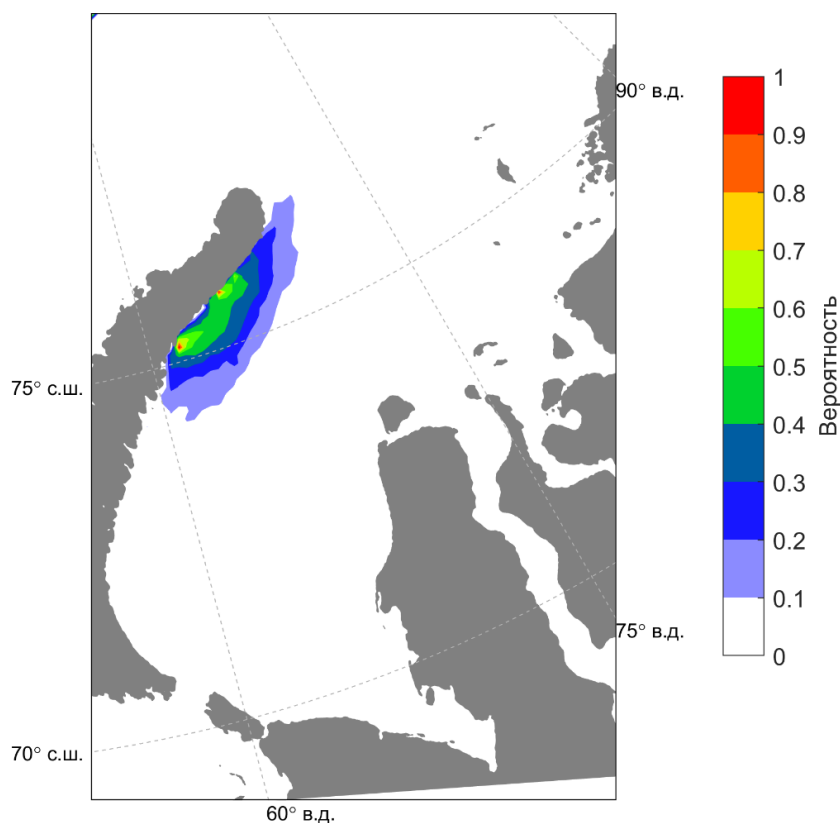


Рисунок 5. Вероятность появления айсберга по айсбергопродуктивности

Наибольшая вероятность наблюдается у двух выводных ледников, ледяной сток которых содержит максимальные значения. Это Ледник Розе (0,98) и Ледник Вершинского (0,96). У ледника Рождественского вероятность появления айсберга составила 0,59.

Такие высокие значения связаны с тем, что мы пренебрегаем потерями льда у ледника при обрушении айсберга или при формировании кусков или обломков. То есть, весь лед, который имеется в леднике уходит на формирование айсберга без погрешностей. Таким образом, время накопления необходимого объема становится меньше, и айсберги генерируются быстрее.

*Полная вероятность появления айсберга с использованием данных наблюдений.*

В данном методе оценки вероятности появления айсберга использовались условные и полные вероятности, а также данные судовых наблюдений за айсбергами.

Расчет полей условной вероятности осуществляется следующим образом. В заданной начальной точке генерации, которая приурочена к выводному леднику на побережье Новой Земли, обеспечивается постоянная генерация айсбергов, которые распространяются по акватории под действием различных сил. В данном случае в модели в условии генерации прописывается, что, если ячейка сетки модели, соответствующая координатам выводного ледника, оказывается пустой (отсутствуют айсберги), то происходит генерация нового айсберга. Таким образом, у нас сохраняется условие о существовании точки с постоянным присутствием ледяного объекта.

После реализации модели вероятность рассчитывается как суммарное время нахождения айсберга в ячейке сетки модели ко всему времени моделирования. На рисунке 6 показаны карты условной вероятности для разных точек генерации. В приложении 1 представлены карты условной вероятности для всех ледников.

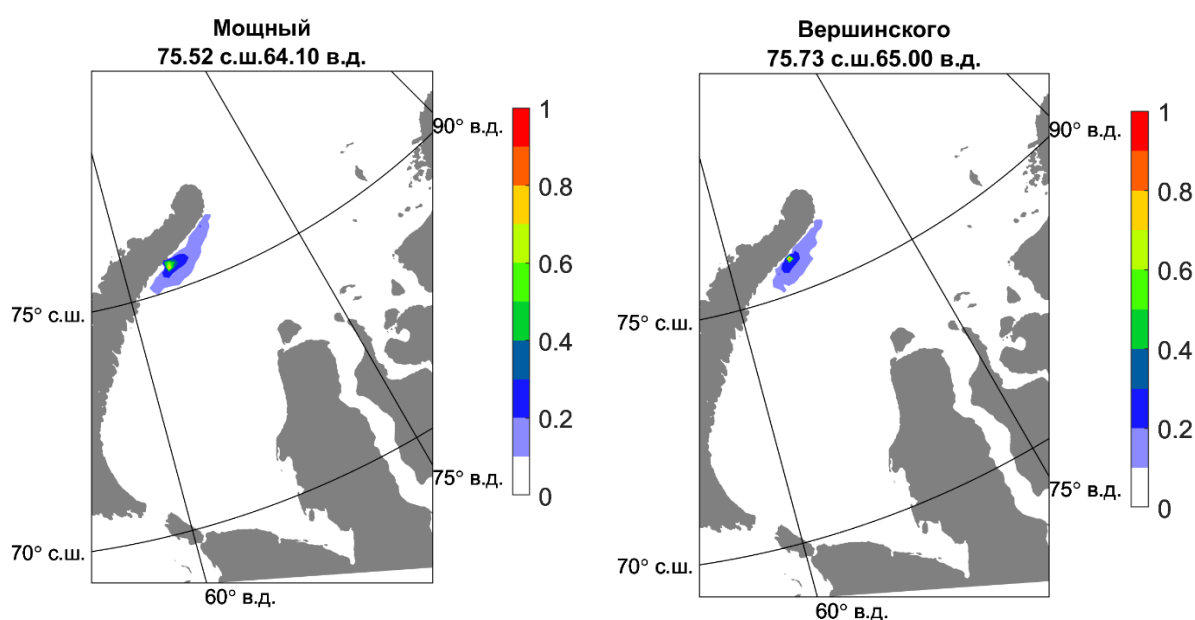


Рисунок 6. Условная вероятность для различных точек генерации.

Затем полученные поля условной вероятности необходимо умножить на вероятность обнаружения айсберга в начальной точке. Значения были получены на основе натурных наблюдений. Оценка айсберговой опасности по данным авиаразведки рассчитывалась как сумма айсбергов в каждой ячейке сетки модели к общему количеству айсбергов, которые наблюдались в ходе авиационных ледовых разведок айсбергов с 1934 по 1991 гг. В таблице 2 описаны координаты и вероятность появления айсберга по данным наблюдений для всех ледников, которые использовались для вычисления айсберговой опасности.

Таблица 2. Данные по Новоземельским ледникам, используемые при моделировании

Название	Широта, °	Долгота, °	Вероятность
Залив Медвежий	74,17	58,70	0,0007
Серп и Молот (Залив Цивольки)	74,55	60,00	0,0015
Голубой (Залив Ога)	74,72	60,00	0,0068
Полисадова	74,99	61,00	0,0167
Нансена	75,15	61,50	0,0068
Кропоткина	75,30	62,50	0,0091
Мощный	75,52	64,10	0,0242
Вершинского	75,73	65,00	0,0015
Рождественского	75,78	65,50	0,0007
Средний	75,91	66,50	0,0038
Розе	75,98	67,00	0,0189

Как видно из таблицы, вероятности появления айсберга очень малы. На полученных результатах сказывается нерегулярность производимых наблюдений. Кроме того, в современных реалиях полномасштабные съемки довольно дороги и значительную часть наблюдений проводят частные компании. Полученная ими информация часто бывает недоступной.

Для получения айсберговой опасности необходимо просуммировать поля условной вероятности, умноженные на значение вероятности появления айсберга в начальной точке. Распределение полной вероятности встречи с айсбергом представлено на рисунке 7.

На рисунке 7 отмечается небольшое значение вероятности появления айсберга для всей изучаемой акватории, не более 3%. Максимальные вероятности сконцентрированы у выводных ледников. Небольшое распространения айсбергов на восток связано со сложной ледовой обстановкой в период гидрологической зимы и выносом айсбергов в северном направлении.

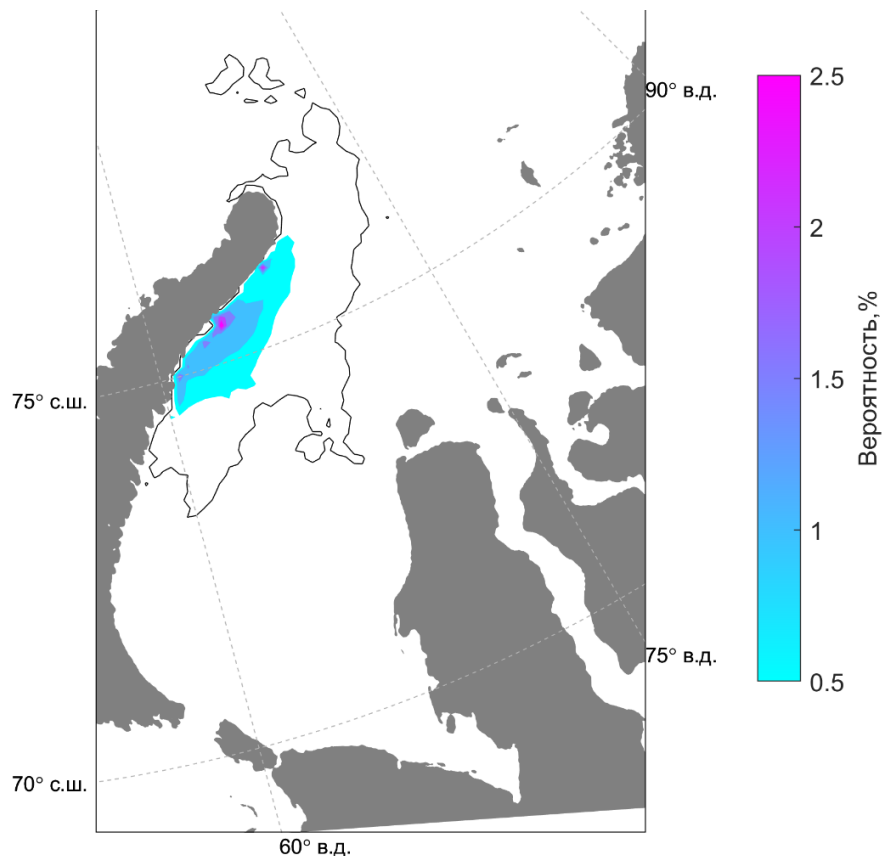


Рисунок 7. Полная вероятность обнаружения айсберга

*(Линией на карте выделена вероятность 0,1%, которая означает появление айсберга в точке хотя бы один раз в месяц. Эта информация также является значимой для инженерных расчетов.)*

#### 4.3.2. Средние направления и скорости дрейфа

Существует два подхода к расчету режимных характеристик дрейфа айсберга. Первый метод основан на построении траекторий дрейфа айсберга за определенный промежуток времени, в основе второго лежит ограничения пространства дрейфа айсберга небольшим расстоянием от точки генерации.

В первом случае происходит расчет дрейфа одного и того же айсберга при смене внешних полей: айсберг дрейфует в течение 7 дней, затем происходит запись его траектории и айсберг возвращается в начальную точку. Таким образом, получается набор траекторий при изменении полей вынуждающих сил. Такой метод позволяет оценить, как будет вести себя определенный тип айсберга в различных гидрометеорологических условиях. Минус такого метода заключается в том, что размеры района, в которых происходит дрейф, будут варьироваться от сезона. В таком случае не исключены наложение изучаемых районов друг на друга и неверная трактовка результатов.

Во втором случае происходит расчет дрейфа различных айсбергов, которые друг за другом распространяются из точки генерации в пределах заданного района. Дрейф айсберга не ограничен временем. Такой подход позволяет отследить генеральное направление дрейфа айсберга, независимо от смены метеорологических параметров и формы айсберга. Неточность результатов может быть вызвана построением нехарактерных траекторий (например, при прохождении циклональных структур, под воздействием ветра, вращающегося по окружности, айсберг может двигаться по петлеобразной траектории. Если это движение будет проходить в пределах заданного региона, оно так же будет включено в расчет, и приведет к ошибкам в расчетах).

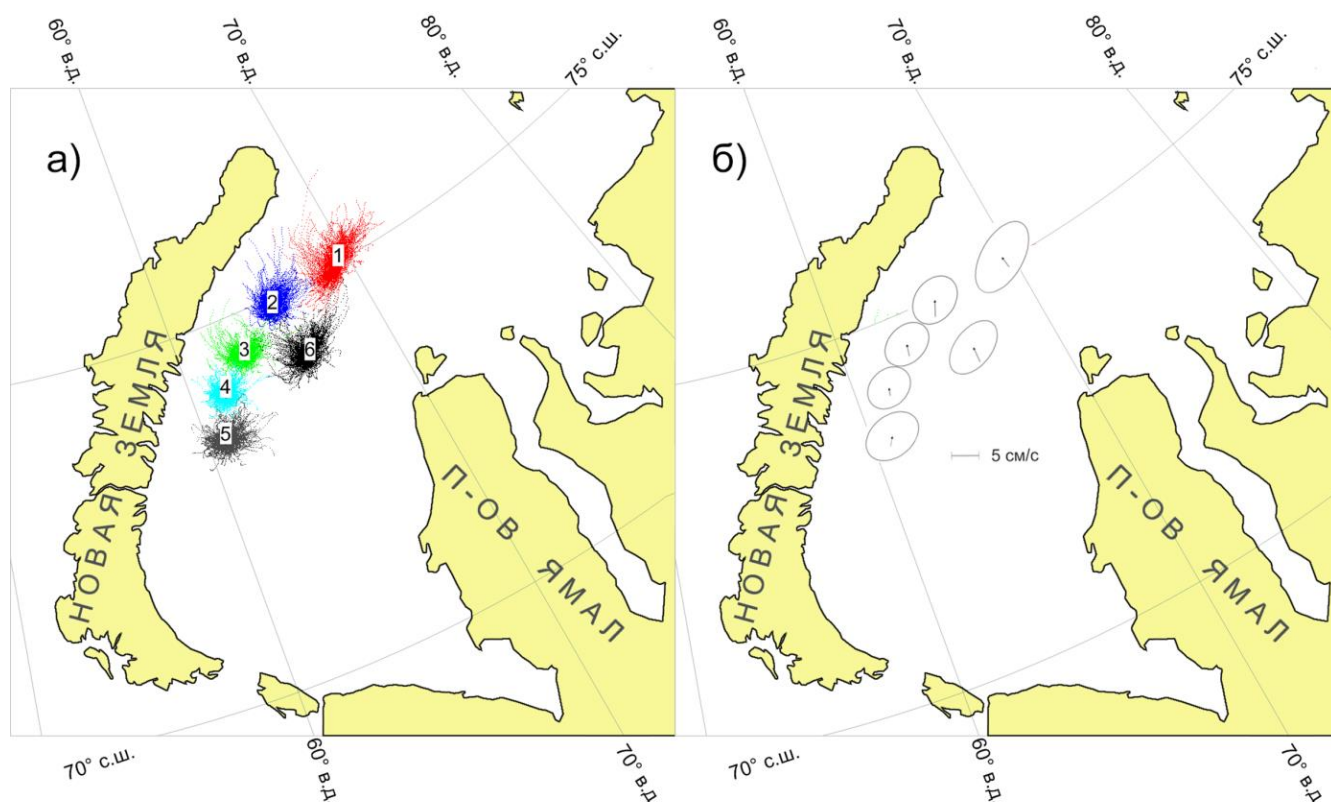


Рисунок 8. Пример расчета режимных характеристик скорости дрейфа айсбергов для 6 точек (а – недельные траектории дрейфа айсбергов. б - средние вектора дрейфа айсбергов и эллипсы среднеквадратического отклонения).

В данной работе произвольным образом было выбрано 6 точек на акватории Карского моря, для которых выполняется расчет режимных характеристик скоростей дрейфа айсбергов (Рис. 8) (Тюгалева, Май, 2019; Tiugaleva et al, 2019).

На рисунке 8а представлены траектории айсбергов, дрейфовавших в течение одной недели от места начального положения. После семи дней дрейфа траектория записывалась, а айсберг возвращался в начальную точку для воспроизведения новой траектории, обусловленной гидрометеорологическими условиями.

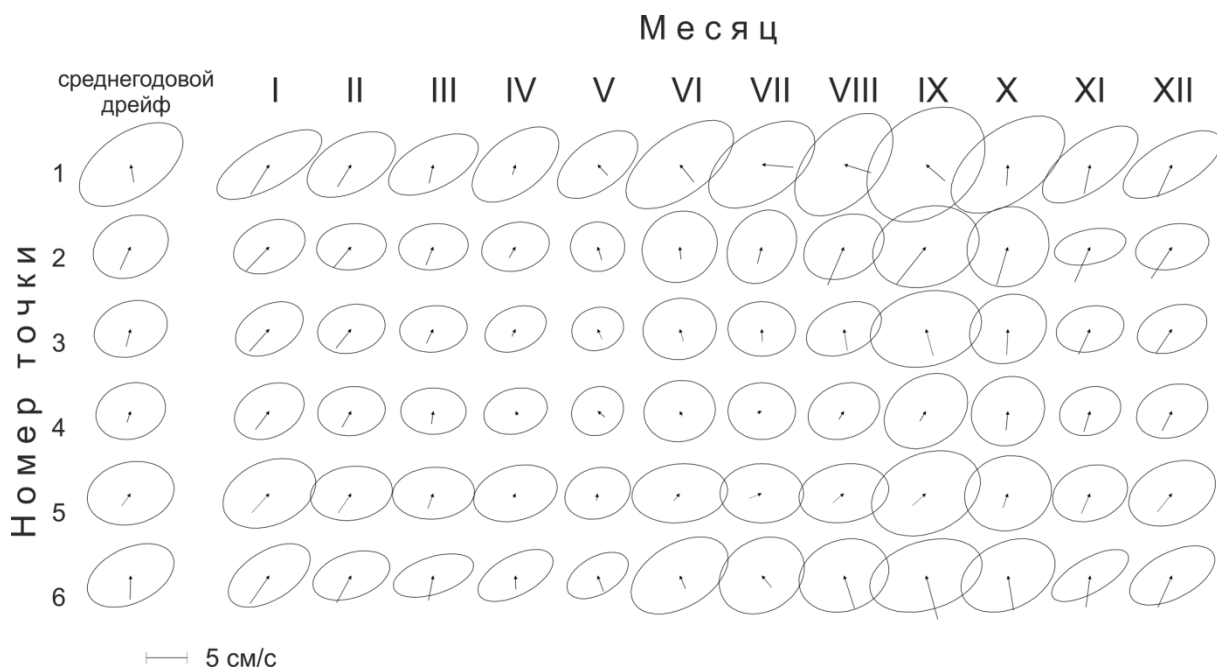


Рисунок 9. Сезонная изменчивость характеристик скорости дрейфа айсбергов для 6 точек.

Для точки № 1 максимальная среднемесячная скорость дрейфа айсберга составила почти 3,5 см/с в январе, в летние месяцы среднемесячная скорость дрейфа айсберга меньше аналогичного показателя для зимних месяцев. Максимальные значения среднеквадратического отклонения скоростей дрейфа айсберга для данной точки достигают почти 8 см/с. Эллипс среднеквадратического отклонения имеет выраженное сжатие (коэффициент сжатия от 0,3 до 0,7) и ориентацию на северо-восток – юго-запад.

Для точки № 2 характерны интенсификация скорости дрейфа айсберга в августе и сентябре (максимальная среднемесячная скорость дрейфа немногим более 5 см/с), и ослабление среднемесячных скоростей дрейфа в весенние месяцы (около 2 см/с). Практически во все месяцы средний перенос айсбергов в точке №2 направлен на север - северо-восток.

Максимальный модуль среднемесячной скорости дрейфа айсбергов в точке № 3 отмечается в сентябре (более 4 см/с). Минимальное значение среднемесячной скорости дрейфа составило 0,5 см/с в марте. Генеральный дрейф айсбергов в радиусе 20-30 км от точки № 3 направлен преимущественно на север-северо-восток.

Для точки № 4 максимальные значения модуля среднемесячного дрейфа айсбергов составляют 1,5-2,0 см/с (отмечаются с июля по октябрь), что несколько меньше аналогичных параметров, оцененных в точках 1-3. Величина большой полуоси эллипса среднеквадратического отклонения скоростей дрейфа айсбергов в этой точке не имеет выраженного сезонного хода и колеблется в пределах 3-5 см/с.

В точке № 5 сезонный ход среднемесячных значений модуля дрейфа айсбергов также имеет максимальные среднемесячные скорости дрейфа (более 2,5 см/с), приходящиеся на летние месяцы (июль-август). Среднемесячный перенос для февраля практически отсутствует.

В точке № 6 модуль среднемесячного переноса дрейфа айсбергов имеет максимум в августе-сентябре (более 4 см/с), минимум - в весенние месяцы: около 1,5 см/с. Выявленного сезонного хода в среднемесячной дисперсии скоростей дрейфа айсбергов сезонной изменчивости нет: большая полуось эллипса среднеквадратического отклонения меняется от 4 до 6 см/с (Рис. 9).



## Заключение

На основе имеющихся моделей дрейфа айсберга была составлена численная модель дрейфа айсберга с полным описанием сил. В модель включаются как наиболее распространенные и очевидные силы (сила воздействия ветра, течений), так и силы, используемые не во всех моделях и дополняющие её (сила, обусловленная наклоном уровня моря). Верификация результатов моделирования показала, что модельные данные имеют тесную связь с результатами натурных измерений. Корреляция векторов смещения моделируемого и измеренного трека айсберга составила 0,98 вдоль параллели и 0.99 для меридиана. Средняя абсолютная ошибка положения моделируемого айсберга составила 700 м.

Для моделирования необходимо знать параметры айсберга. Так как в работе используются гипотетические случаи возникновения айсберга, необходимо, чтобы параметры айсберга определялись в модели независимым способом. Для этого невозможно использовать данные одного конкретного айсберга. В связи с этим на основе базы данных ААНИИ были выведены регрессионные соотношения для получения параметров айсберга в зависимости от его длины, которая в модели также задается случайным образом по нормальному распределению.

Так как моделирование происходит за длительный промежуток времени, необходимо задать условия разрушения айсберга. В связи с этим в модели присутствует фактор волнового воздействия на айсберг, который вызывает разрушение последнего. Он является одним из наиболее значимых факторов разрушения. В работе используется только этот параметр также из-за сложности описания других факторов, влияние на айсберг которых малоизучено и представляется сложным математическим описанием.

С использованием описанной модели, выведенных регрессионных соотношений и параметра таяния айсберга была создана диагностическая система моделирования дрейфа айсберга для юго-западного региона Карского моря. Анализ полученных треков показал, что модель вполне достоверно описывает дрейф, характерный для данного региона (вынос айсбергов на север – северо-восток).

В работе описан новый метод оценки айсберговой опасности, основанный на модельных расчетах условной вероятности появления айсберга. Помимо этого, описаны два варианта представления айсберговой опасности: по айсбергопродуктивности и по теореме полной вероятности, где используются оценки встречи айсбергов по данным авиационных разведок. В рассматриваемой части исследуемой акватории отмечается увеличение айсберговой опасности в направлении от юго-востока к северо-западу. Это характерно для обоих вариантов представления информации об айсберговой опасности.

Анализ скоростей дрейфа в Карском море показал, что изменчивость скоростей дрейфа превалирует над скоростью среднемесячного переноса айсбергов. В этой части акватории среднемесячный перенос айсбергов происходит преимущественно в северном и северо-восточном направлении. Такие результаты моделирования совпадают с оценками генерального направления дрейфа, описанные в работе (*Buzin et al., 2019*).

Для модуля скорости среднемесячного переноса айсбергов отмечается выраженный сезонный ход: как правило, в летние и осенние месяцы модуль среднемесячного дрейфа айсбергов максимален, и минимален в весенние месяцы.

Полученные оценки режимных характеристик айсберговой опасности могут быть использованы при проектировании и планировании эксплуатации гидротехнических сооружений на шельфе арктических морей.

## Список литературы

### Монографии:

1. Бородачев В. Е., Гаврило В. П., Казанский М. М. Словарь морских ледовых терминов. СПб: Гидрометеиздат, 1994. 128 с.;
2. Варнакова Г.М., Корякин В.С. Каталог Ледников СССР, Том 3. Л: Гидрометеиздат, 1978. 114 стр;
3. Шнейдер В. Е. Краткий курс высшей математики. М: Высшая школа, 1972. 640 с.

### Статьи:

1. Клячкин С.В., Май Р.И. Прогностическая модель дрейфа айсберга // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. №1(91). с. 78-88;
2. Миронов Е. У., Смирнов В.Г., Бычкова И. А., Кулаков М. Ю., Демчев Д.М. Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. №2 (104). с. 21-32;
3. Keghouche I., Bertino L., Lisaeter A. Parameterization of an iceberg drift model in the Barents Sea // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. № 26 (10). p. 2216– 2227;
4. Keghouche I., Counillon F., Bertino L. Modeling dynamics and thermodynamics of icebergs in the Barents Sea from 1987 to 2005 // Journal of geophysical research. 2010. vol. 14;
5. Lavergne T., Eastwood S., Teffah Z., Schyberg H., Breivik L.A. Sea ice motion from low resolution satellite sensors: An alternative method and its validation in the Arctic // Journal of Geophysical research. 2010. vol. 14;
6. Neshyba, S., Josberg E.G. On the estimates of Antarctic iceberg melt rate // Journal of Physical Oceanography. 1980. p. 1681-1685;
7. Padman. L., Erofeeva S. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophysical Research Letters. 2004. vol. 4;
8. Smith S.D. Hindcasting iceberg drift using current profiles and winds // Cold Regions Science and Technology. 1993. № 22, p. 33–45.

### Фондовые материалы:

1. Abrahamowicz M. A. Thermodynamic and dynamic lagrangian model for icebergs: a data–model intercomparison for the Southern Ocean // McGill University. 2007. vol. 113;
2. Broström G., Melsom A., Sayed M., Kubat I. Iceberg modeling at met.no: Validation of iceberg model // Norwegian Meteorological Institute met.no, Report №17. 2009. vol. 36;
3. Savage, S.B. Aspects of iceberg deterioration and drift // Lecture Notes in Physics Series: Geomorphological Fluid Mechanics. 2001. vol. 40;

4. Smith S.D., Donaldson N.R. Dynamic modeling of iceberg drift using current profiles // Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences №91. 1987. vol.133;
5. Wallcraft A., Carroll S.N., Kelly K.A., Rushing K.V. Hybrid coordinate ocean model (HYCOM) // User's guide. 2003. vol. 12.

Материалы конференций:

1. Май Р.И., Павлова Е.А., Тюгалева А.И., Хотченков С.В. Регрессионные соотношения между геометрическими параметрами айсбергов // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 2018. с. 415-418;
2. Тюгалева А.И., Май Р.И. Численное моделирование дрейфа айсберга // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 2018. с. 655-658;
3. Bertino L., Evensen S. The DIADEM/TOPAZ monitoring and prediction system for the North Atlantic // Third EuroGOOS conference: Building the European capacity in operational oceanography. 2003. с. 251-257;
4. Buzin I.V., Nesterov A.V., Gudoshnikov Yu.P., Pashali A.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Stragnikov D.S. The main results of iceberg drift studies in the Russian Arctic throughout 2012-2017 // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference. 2019. p. 691-698;
5. May R. I., Guzenko R. B., Mironov Ye. U., Naumov A. K., Skutin A. A., Skutina E.A., Sobotuk D.I., Zamarin G. A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Mamedov T.E. Geometry and mass of icebergs in the Russian Arctic // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference. 2019. vol. 8;
6. Tarasov P.A., Kornishin K.A., Lavrentiev I.I., Mamedov T.E., Glazovsky A. F., Bagorian E.S., Efimov Y. O., Buzin, I.V., Salman P.A. Outlet glaciers as iceberg factories: Case Study for the Kara Sea // Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference. 2019. p. 671-678;
7. Tiugaleva, A.; Guzenko, R.; Klyachkin, S.; May, R. Method of iceberg hazard estimation in the Kara Sea, based on realizations of the numerical model // 19th international multidisciplinary scientific geoconference «SGEM 2019». 2019. p. 977-984.

Ресурсы сети Интернет:

1. <https://marine.copernicus.eu/>

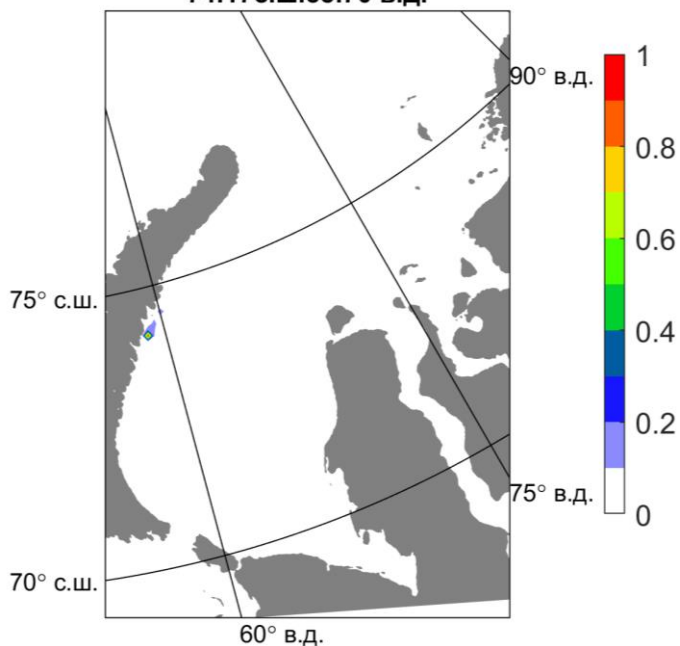
Product user manual for Arctic Ocean Physical and Bio Analysis and Forecasting Products and Physical and BIO Reanalysis Products;

2. <https://www.ecmwf.int/>

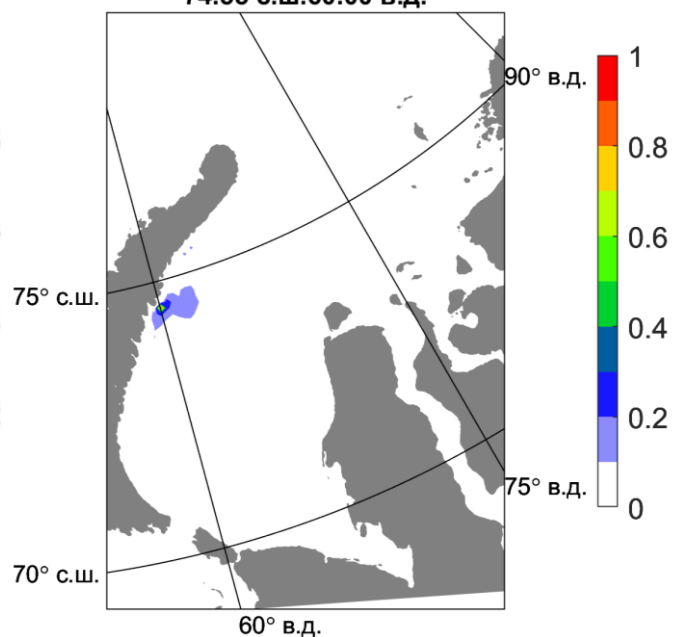
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

## Приложение 1. Карты условной вероятности

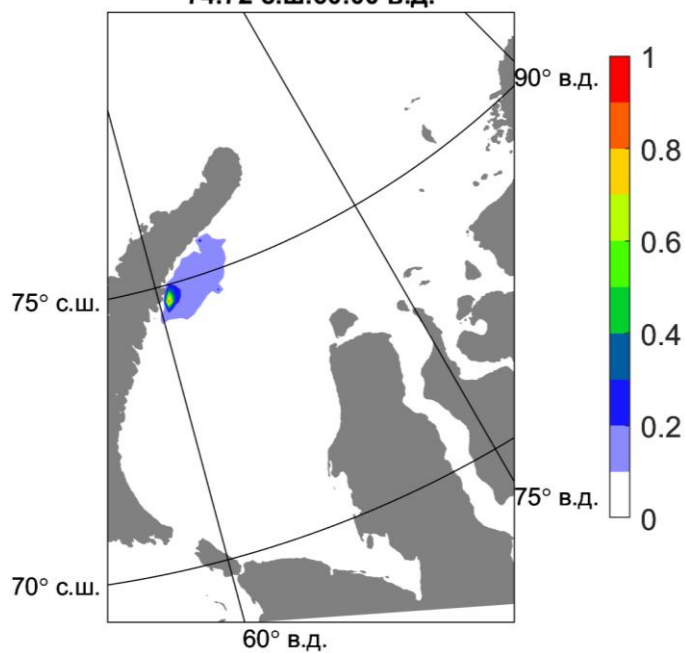
**Залив Медвежий**  
74.17 с.ш. 58.70 в.д.



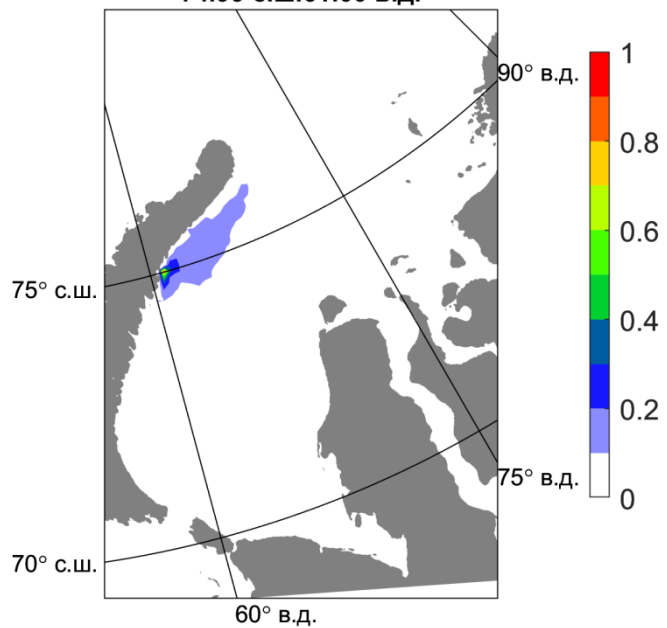
**Серп и Молот**  
74.55 с.ш. 60.00 в.д.



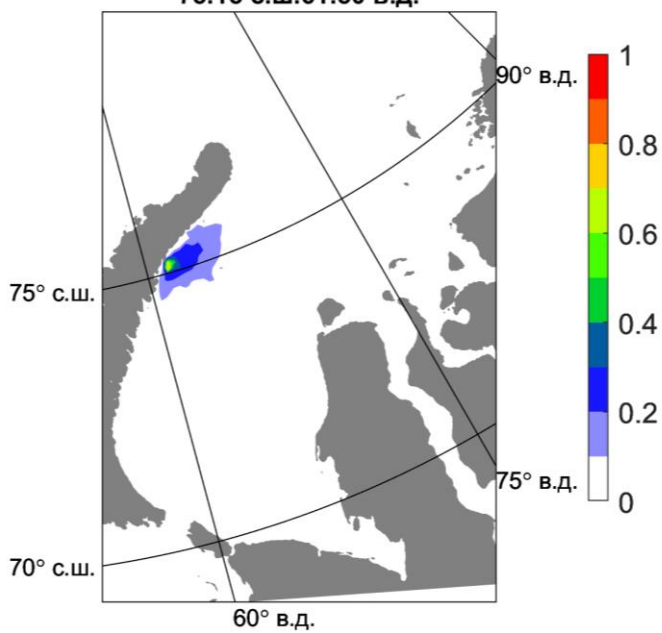
**Голубой**  
74.72 с.ш. 60.00 в.д.



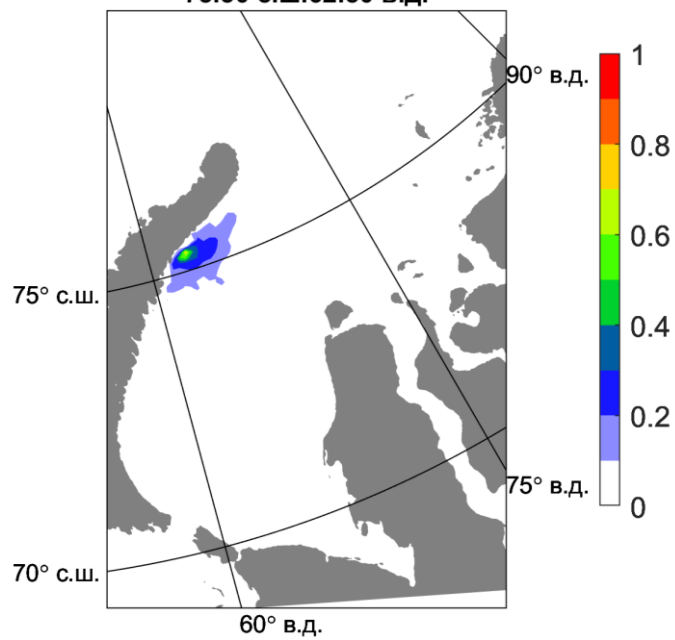
**Полисадова**  
74.99 с.ш. 61.00 в.д.



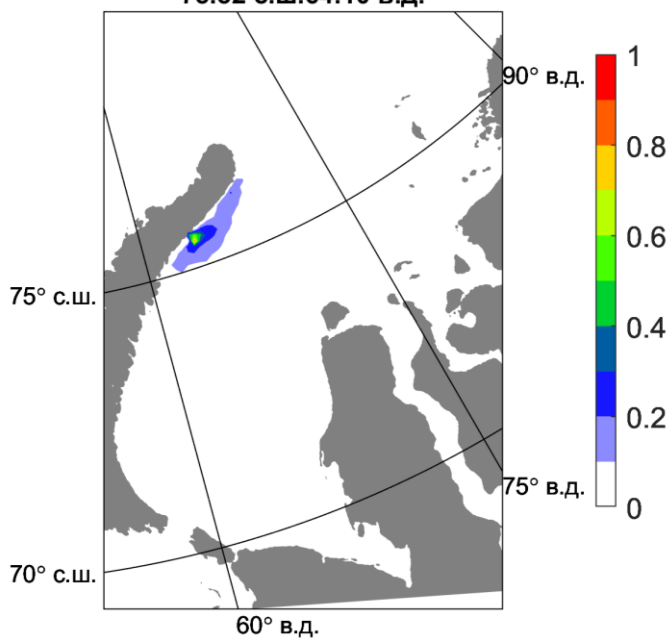
**Нансена**  
75.15 с.ш.61.50 в.д.



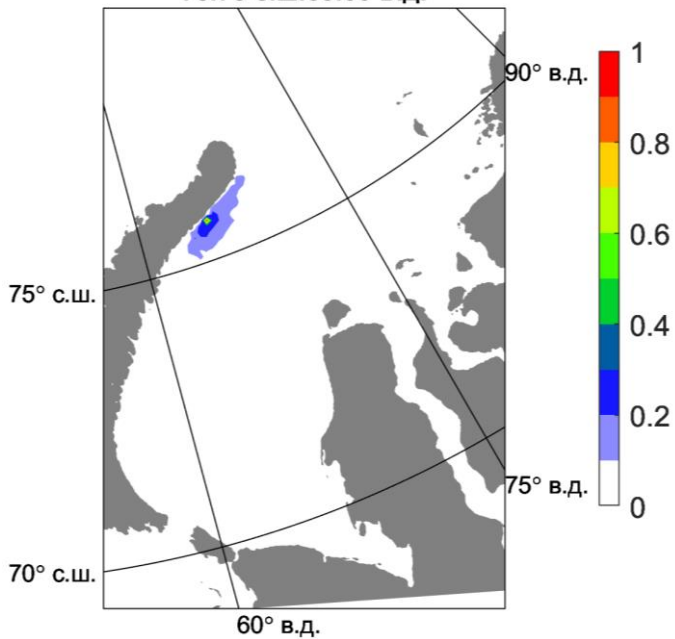
**Кропоткина**  
75.30 с.ш.62.50 в.д.



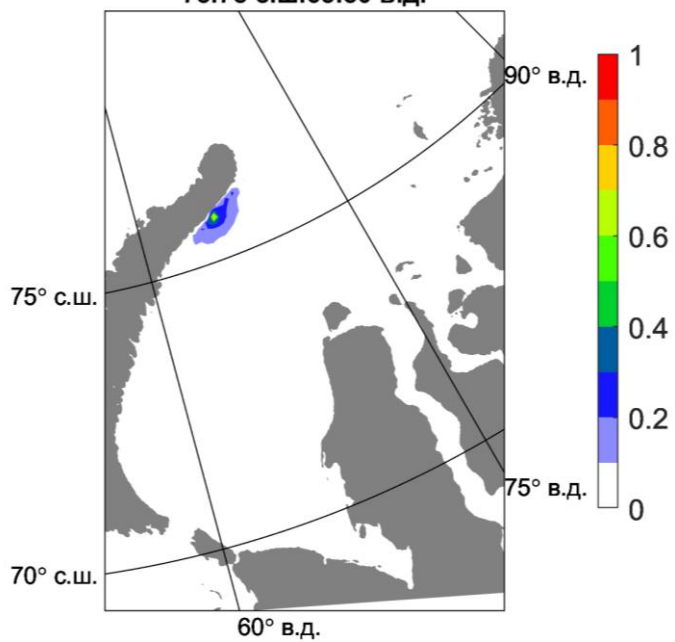
**Мощный**  
75.52 с.ш.64.10 в.д.



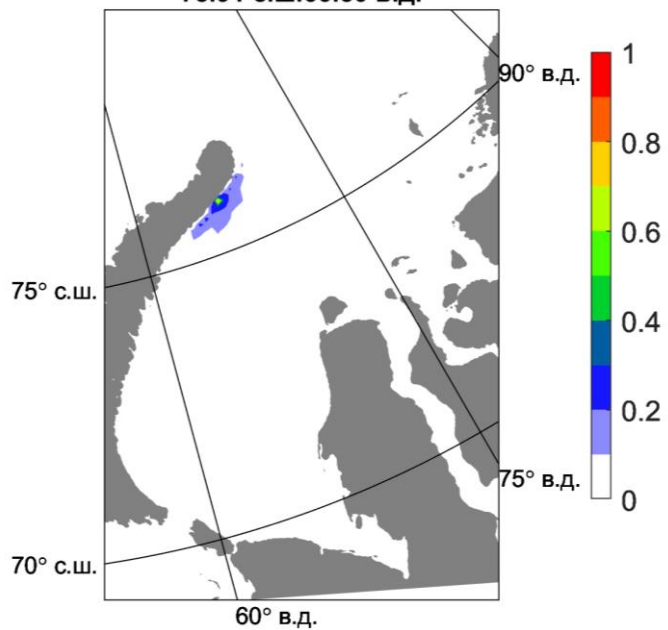
**Вершинского**  
75.73 с.ш.65.00 в.д.



**Рождественского**  
75.78 с.ш.65.50 в.д.



**Средний**  
75.91 с.ш.66.50 в.д.



**Розе**  
75.98 с.ш.67.00 в.д.

